

## 硬質異物を混入した場合の潤滑摩耗

豊嶋敏雄\* 田中良和\*\*

Wear Characteristics under Lubrication with  
Oil Containing Abrasive Particles

Toshio TESHIMA and Yoshikazu TANAKA

(Received Feb.20,1988)

The effect of abrasive particles on the wear under oil lubrication was studied, and a cup-and-disc type test machine and oil containing fine abrasive particles a little are used. The results are summarized as follows:

- 1) Abrasive particles are embeded mainly into the softer specimen and the harder specimen is chiefly abraded and so its wear volume is larger.
- 2) Generally, the wear rate increases with the increase of load or grit size up to certain values respectively. Beyond the conditions the wear rate decreases.
- 3) Wear surfaces become rougher with increase of the wear rate, and are like the adhesive wear surfaces.
- 4) Under the oil lubrication containing fine abrasive particles a little, the load supporting rate of particles is small as compared with that of the wear surface asperities, and so particles cause to hasten the adhesive wear by making fresh nucleuses of adhesion by scratching rather than direct abrasive wear.

### 1. 緒 言

機械の寿命は、特に高精度機械では破壊よりも摩耗による精度低下・機能低下によって定まることが多い。従って潤滑油中に硬質異物が混入してアブレシブ摩耗を起す事態は極力避けなければならない。そのため潤滑系には密封装置やろ過器が使用され、混入する異物の量は少なく、その粒度は小さい。そのような微粒の異物を微量含む場合の潤滑摩耗の研究は少なく、その特性を研究成果の多い典型的なアブレシブ摩耗や凝着摩耗の特性から推測することは困難である。そこで本研究では、潤滑摩耗について微粒の砥粒が微量混入した場合の影響を実験的に研究した。

---

\*機械工学科 \*\*トヨタ自動車(株)

## 2. 実験装置, 試験片および実験方法

使用した実験装置は四球式摩擦試験機であり, 主軸回転速度を無断変速とし, 鋼球取付け部をカップ円板式摩擦試験ができるように改造している。

図1は試験片取付け部を示す。①は上側カップ形試験片で, 改造主軸にねじ込んでとめられる。②は下側円板式試験片で, 片当りを避けるため球で支持され, ピン③で回り止めされている。両試験片は完全に油中で摩擦試験される。試料油が下側試験片の油穴を通して上側試験片のスロット部を通過し循環するように, ④の羽根車を回転させる。従って試料油は上側試験片と羽根車の回転によって複雑に攪拌され, 砥粒は沈澱しない。摩擦トルクを回り止め板に貼りつけたひずみゲージ⑤で検出できるが, 本研究では試験中の異常摩擦の監視にのみ利用した。

図2は上側カップ形試験片Aおよび下側円板式試験片Bの形状, 寸法を示す。Aは市販のS45C丸棒を切削加工し, Bは摩擦面を研削仕上げしている。その化学組成を表1に示す。材質組合せの影響を調べる場合には, 850℃, 15min保持後焼入れ, 180℃, 30min焼戻したA(H), 99.9%純銅A(Cu), 99.5%純アルミニウムB(Al), 硬質塩化ビニルB(PVC)を使用した, それらの材質と表面あらさを

表2に示す。広い実験条件で砥粒混入の影響を試験できるように, 潤滑油としては比較的耐荷重能のよい極圧添加剤を含んだギヤ油3種(98.9℃粘度14cSt)を使用した。硬質異物としては, GC砥粒#600(平均粒径 $28\mu\text{m}$ )から#8000(平均粒径 $1\mu\text{m}$ )まで7種類を使用した, 粒径の影響を調べる場合以外は主として#2000を使用した。またその混入率範囲は重量比0.5%以下としたが, 混入率の影響を調べる場合以外は重量比0.1%一定とした。

実験条件は, 平均摩擦速度を約0.25~1.6m/s, 荷重を約200~1500Nとし, 試験時間は摩擦の時間的経過を調べる場合以外は30min一定(摩擦速度1.41m/sの場合の摩擦距離は2540m)である。

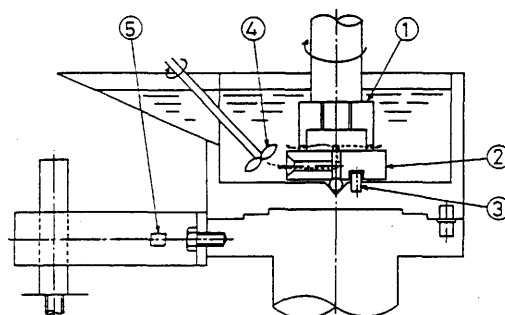


図1 摩擦試験機(試験片取付部)

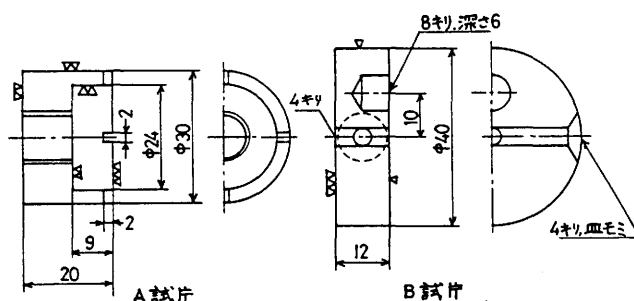


図2 試験片A, Bの形状および寸法

表1 炭素鋼試料の化学組成

	化学成分%				
	C	Si	Mn	P	S
A, A(H)	0.44	0.23	0.70	0.019	0.011
B	0.48	0.22	0.75	0.028	0.021

表2 試験片材質と表面あらさ

	かたさ Hv	引張り強さ MPa	あらさ R <sub>max</sub> μm
A	184	392	6
A(H)	479		5
A(Cu)	98	206	3
B	231	392	6
B(Al)	35	78	3
B(PVC)	15	58	1

### 3. 実験結果および考察

図3は鋼-鋼組合せの場合の摩耗の時間的経過を示す。試験条件は図中に示すように、摩擦速度1.41m/s、荷重924N、#2000GC砥粒0.1%混入の場合で、以下同様の表示法をとっている。また○、●はそれぞれ上側A試験片、下側B試験片の30minごとの区間摩耗量を、◐、◑は累積摩耗量を示している。相対的にわずかに軟らかい上側試験片の摩耗量が少なく、硬い下側試験片のほうが多くなっているが、その摩耗率は次第に減少している。

図4は比較のために、砥粒を混入しない場合の30min間の摩耗量を示す。荷重924Nの摩耗量を比較すると、砥粒が0.1%でも混入すると摩耗量がかなり多くなることがわかる。しかし砥粒混入率に比例して摩耗量が増加するわけではない。さらに図4の砥粒を混入しない場合には、図3、図5と異なり、軟らかい上側試験片が多く摩耗している。図6は鋼-銅組合せの場合の摩耗進行曲線を示し、材質組合せ以外の実験条件は図3と同様である。この場合には、軟らかい銅側の摩耗量が鋼側試験片よりかなり少なく、反対に鋼側試験片の摩耗量は図3のどちらの鋼試験片よりも多くなっている。

ラップ仕上では、一般に被加工材よりも軟らかいラップが使用され、ラップのほうの摩耗量が多くなっている。<sup>1)</sup> 笹田らの研究<sup>2)</sup>によると、Feといくつかの純金属を組合せた三元摩擦において、砥粒の切削作用が抑制されないように潤滑されている場合には、Feの比摩耗量は変わらず、相手金属のそれは硬さの増大とともに減少する。そして組合せの相対的に軟らかい試験片側に主として砥粒が埋め込まれ、硬い側が主として削られるという間考えられているような事は見られな

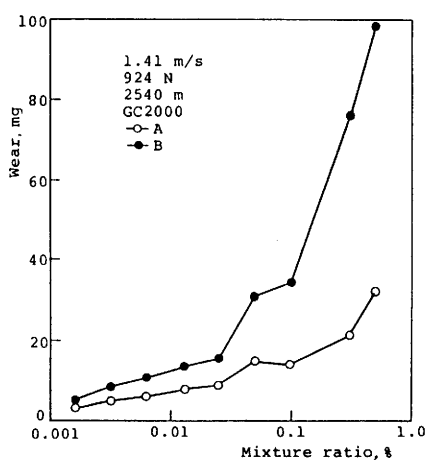


図5 砥粒混入率の影響

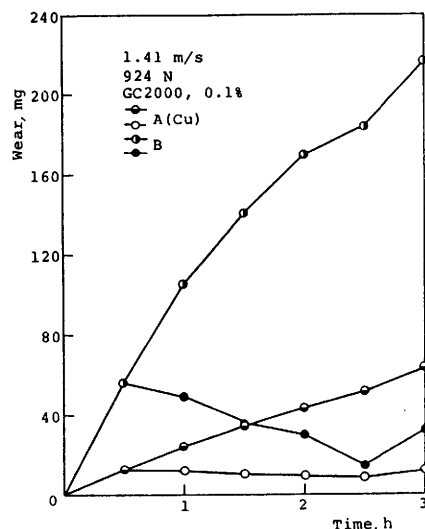


図3 摩耗進行曲線(鋼-鋼組合せ)

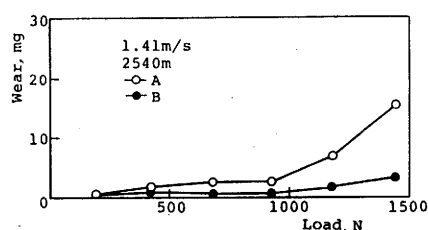


図4 摩耗と荷重の関係(混入砥粒なし)

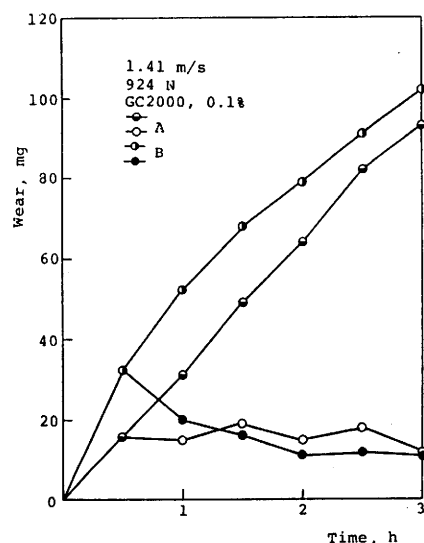


図6 摩耗進行曲線(鋼-銅組合せ)

たとと述べている。

凝着摩耗量 $W_1$ およびアブレシブ摩耗量 $W_2$ はそれぞれ次式で示される。<sup>3)</sup>

$$W_1 = kPl/3p_m$$

$$W_2 = Pl \tan \theta / \pi H$$

上式中の $p_m$ ,  $H$ はそれぞれ塑性流動圧力, 硬さであり, 凝着摩耗でもアブレシブ摩耗でも硬い材料は摩耗しにくいはずである。しかし図3, 図5, 図6の実験結果は, 硬い試験片側で摩耗量が多くなっており, 軟らかい試験片側に主として砥粒が埋め込まれ, 硬い側が主として削られると考えなければ説明しがたい。

図7は鋼-銅組合せの場合の摩擦面写真およびその面分析結果を示す。鋼側摩擦面にはアブレシブ摩耗的な引掻き条こんが見られ, 移着成分はほとんど検出されないが, 銅側摩擦面には砥粒成分 $Si_i$ や相手成分 $Fe$ が観察される。このことは, 軟らかい銅側に主として砥粒が埋め込まれ, 硬い鋼側が主として削られ, 銅の移着も起りにくいことを意味している。

図8は, 鋼試験片( $H_v=231$ )に5種類の試験片材料を組合せた場合の比摩耗量を, それぞれ組合せた材料の硬度に対して示している。図3および図6からわかるように, 30min間の摩耗試験では定常状態に達しているとは言えないが, 一応30min間の摩耗量から比摩耗量を算出している。また硬質塩化ビニル(PVC)は摩擦熱で軟化するので, 特に摩擦速度および荷重を低く,  $0.57\text{ m/s}$ ,  $250\text{ N}$ としている。PVCの場合を除くと, 組合せの硬い試験片側で比摩耗量が大きく, またS45C( $H_v=231$ )の比摩耗量は一定ではなく, 相手材料によって変り, Cuとの組合せで最も大きく

なっている。このような現象は, 図6で述べたように, 軟らかい試験片側に砥粒が主として埋め込まれ, 硬い側が主として削られると考えなければ説明しがたい。Cuの場合には, 砥粒が適当に埋め込まれて保持され, 相手側をよく引掻き, Alの場合には軟らかすぎて, 埋め込まれた砥粒はAlの摩耗を抑制するが, 砥粒の荷重負担率が低く, 相手側に対する引掻き作用が少なく, その比摩耗量が小さくなったものと思われる。PVCはあまりにも軟かすぎて比摩耗量が大きくなっているが, その荒れた摩擦面に比較的破碎されない大きい砥粒が埋め込まれるので, S45Cの比摩耗量はAlとの組合せの場合より大きくなっている。

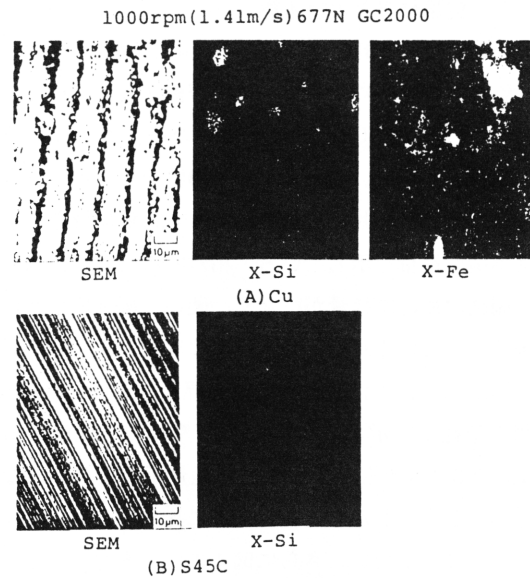


図7 摩耗面写真と面分析結果

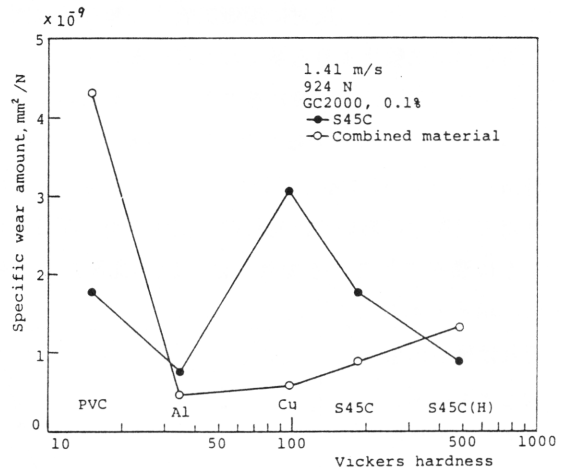


図8 材質(硬さ)組合せの影響

図9は摩耗量と荷重の関係を示す。この場合も相対的に硬い下側試験片の摩耗量が全般的に多い。その摩耗量は荷重の増加とともに初め増加するが、約750N以上では逆に減少している。荷重が増加すると砥粒1粒当りの引掻き溝は大きくなり、摩耗量は増加するが、高荷重域で摩耗量が減少するのは、荷重の増大によって平均摩擦面間隔が減少し、摩擦面間への侵入砥粒数が減少する効果がより大きく現われたものと思われる。このような現象は、遠藤らの摩耗試験結果<sup>4)</sup>やラップ仕上の一般的傾向<sup>7)</sup>として示されているが、本実験における摩耗量の最

大値を示す摩擦圧力がかなり高い点で異なっている。相対的に軟らかい上側試験片は、砥粒による引掻き作用をあまり受けず全体的に摩耗量が少ないが、低荷重約200Nでは下側試験片よりも摩耗量が多くなっている。それは、荷重が小さいため埋め込み砥粒が安定せず、転がるものが多くなるため、相対的に軟らかい上側試験片の摩耗量が多くなったものと思われる。

図10は、図9と同様に摩耗量と荷重の関係を示すが、図9の場合より摩擦速度が高くなっている。図10では下側試験片の摩耗量が荷重の増加とともに減少し、図9の場合と傾向が異なっている。このような現象は#1500砥粒を混入した実験でも同様に見られた。すなわち摩擦速度が異なると、摩耗の対荷重特性曲線が変わるようである。下側試験片の摩耗量は、荷重924Nの場合摩擦速度によってあまり変わらないが、低荷重184Nの場合には摩擦速度が上昇するとき1.0m/s以上で急に増大する現象がみられた。それが図10において低荷重域で摩耗量が減少しない理由であろう。しかし荷重の大きさによって上述のような摩耗の対摩擦速度特性が変わる理由は現時点で十分な説明ができない。なお図10の荷重約1500Nで摩耗量が大きくなっているのは厳しい凝着摩耗状態になったためと思われる、試験後の摩擦面には大きい凝着物やその脱落時の大きい引掻きの条こんが見られた。

図11は上側試験片のスロット数を変えた場合の影響を示す。荷重は一定(924N)であり、スロット数による接触面積の変化で面圧は約3.8~5.1MPaの範囲で変るが、その影響は少なく、摩耗量の変化は主としてスロット数による摩擦面間への砥粒侵入量の変化によると思われる。スロットのない場合の摩耗量は少なく、スロット数の増加とともに初め急に、後徐々に増大している。砥粒は主としてスロット部から摩擦方向(円周方向)に侵入し、半径方向にはほとんど侵入しないようである。ラップ仕上では端に近いところで摩耗が多く、だれが精度上の問題になるが、本実験の場合にスロットの近傍がとくに摩耗量が多くだれを生ずるということとはなかった。図3の摩耗進行曲線からもわかるように、だれを生じてスロット近くのすき間が大きくなり、砥粒が侵入しやすくなることで摩耗率が大きくなるということとはなかった。またスロット近傍に顕微鏡ではっきりと見分けられるような大きい埋め込み砥粒はほとんど観察されず、#2000砥粒でも破碎されないままでは摩擦

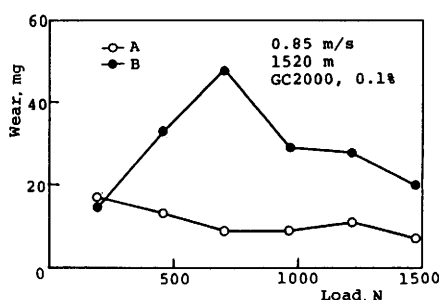


図9 荷重の影響

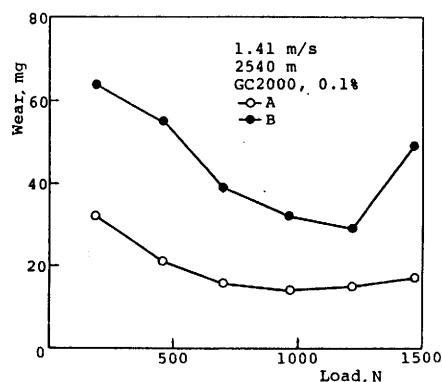


図10 荷重の影響

面に侵入しにくいようである。

図12は摩耗量と平均砥粒径の関係を示す。砥粒混入率は重量比0.1%一定であり、粒径によって混入砥粒数は異なるが、典型的なアプレシブ摩耗では砥粒数や粒度は摩耗に影響しない。しかし実際には砥粒が臨界寸法以下に小さくなると、金属同士の直接接触が増加し、砥粒の荷重負担率が低下するため摩耗量は減少する。<sup>5)</sup> 砥粒径の大きい範囲で粒径が大きくなるほど摩耗量が減少するのは、図9において荷重が大きくなるときに摩耗量が減少するのと同様の理由による。すなわち粒径が大きくなると砥粒が摩擦面間に侵入しにくくなること、また侵入する砥粒も大部分は摩擦面入口(スロット部)で破砕され、実質的に小数の小さい砥粒のみが摩耗に関与する状態になるためである。そのため軟らかい試験片側に主として砥粒が埋め込まれ、硬い側が主として削られるという関係が薄れ、凝着摩耗の性格が次第に強くなり、砥粒が大きくなるときに摩耗量が少なくなるだけでなく、両試験片の摩耗量の差も少なくなる。

本実験の場合、砥粒は主としてスロット部から円周方向に摩擦面間に侵入し、荷重や砥粒平均径が大きくなると砥粒が摩擦面間に侵入しにくくなり、摩耗量がかえって少なくなる現象がみられた。しかしラジアル滑り軸受のように摩擦面間にくさび形すき間が構成されていると砥粒が侵入しやすくなり、粒径がある程度まで大きくなっても摩耗量は減少しなくなるであろう。しかしまた角度の大きいクラッシュリリーフはごみの流入防止に効果があるとも言われている。<sup>6)</sup> 図13は、摩擦面間にくさび形すき間が構成される場合の影響を調べるためのこの配面をもったB'試験片を示し、

AおよびB点における初期すき間はそれぞれ70, 87 $\mu\text{m}$ である。

図14はこう配面をもったB'試験片を使用した場合の摩耗を示し、図15は比較の

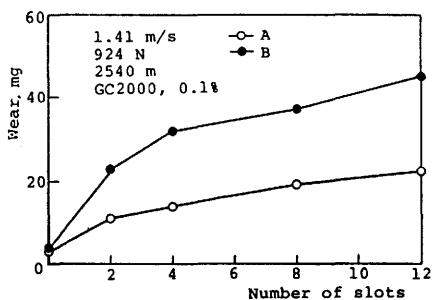


図11 スロット数の影響

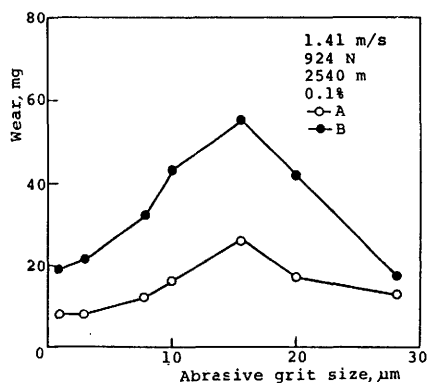


図12 平均砥粒径の影響

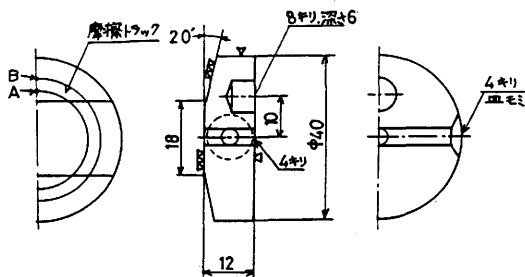


図13 試験片B'の形状および寸法

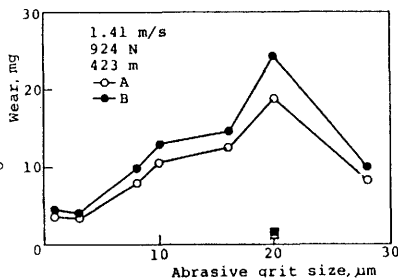


図15 図14との比較図(試験片B)

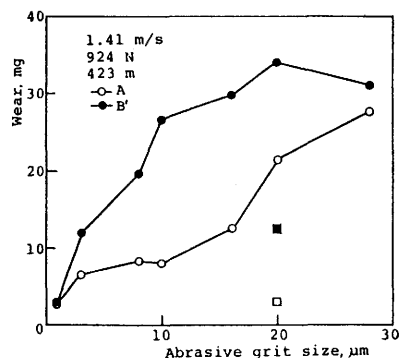


図14 試験片B'を使用した場合の摩耗量

ための平板試験片Bを用いた場合の摩耗を示し、両者のその他の実験条件は同じである。下側試験片が摩耗によって上側試験片と全面的に接触する状態になっては両者の差異はなくなるので、摩擦時間を短くして(5 min, 摩擦距離423m)比較している。くさび形すき間が構成されている図14のほうが全体的に摩耗量が多くなっている。図14において、平均粒径 $20\mu\text{m}$ に対して $28\mu\text{m}$ のとき下側試験片の摩耗量がいくぶん減少しているが、図15の場合ほどの大幅な減少にはなっていない。また粒径 $20\mu\text{m}$ の位置に正方形の実験点が見られるが、それは上側試験片としてスロットのないカップ形試験片を用いた場合を示す。図15ではスロットもくさび形すき間もないため摩耗量が著しく少ないが、図14ではくさび形すき間から砥粒が侵入できるので、かなり摩耗量が多くなっている。

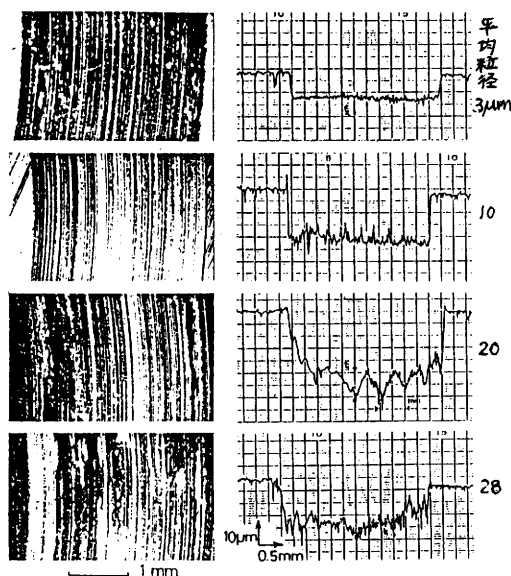


図16 摩擦トラックの写真と断面曲線  
(図14に対応)

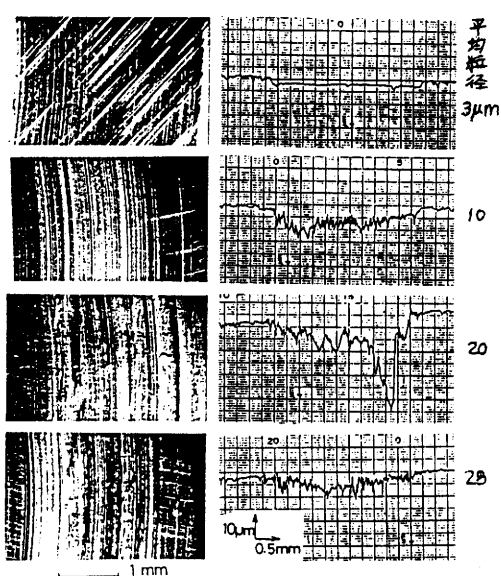


図17 摩擦トラックの写真と断面曲線  
(図15に対応)

図16, 図17はそれぞれ図14, 図15の摩耗試験後の摩擦面写真および断面曲線を示す。両者の断面曲線を比較すると、くさび形すき間の影響が明瞭である。図17の平均粒径 $3\mu\text{m}$ の写真では、摩耗量が少なく、試験前の研削すじが残っている。また図16, 図17の砥粒径 $3\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ の場合の摩擦面写真には、アブレシブ摩耗特有の細い引掻きの条こんが全面的に見られ、凝着物はあまり見られない。それに対して粒径 $20\mu\text{m}$ 以上では、特に摩耗量が最大になった粒径 $20\mu\text{m}$ の場合には、成長した凝着粒子による大きい引掻き溝や脱落后の大きいくぼみが多く、断面曲線に大きいピッチの大きいおう突が多く見られる。厳しい凝着摩耗の荒れた摩擦面の様相を示している。すなわち摩擦面が見かけ上アブレシブ摩耗の様相の場合に摩耗量が少なく、凝着摩耗の様相のとき摩耗量が多い。

図18は図17の平均粒径 $20\mu\text{m}$ の場合の試験後の砥粒および摩耗粉の写真と $S_i$ の面分析結果を示す。油中の沈澱物を採集したままでは凝集し、明瞭に分離して観察することができず、ベンジンで数回洗滌したので、特に小さい破碎砥粒や摩耗粉は無くなっている。①は切りくず状摩耗粉であるが、このような切りくず状摩耗粉は他の多くの摩耗粉の観察ではほとんど見つけることができず、そのま

まの形態で摩擦面外に排出されることは少ないと思われる。多くの摩耗粉は②のような層状構造である。③は④の砥粒と外観が異なっているが、分析結果は④と同様に $Si$ の存在を示し、薄く摩耗粉に包まれているのであろう。

図19(a), (b)はそれぞれ下側試験片B'の摩擦トラックの先頭部、後端部を示す。図14, 図16の砥粒平均粒径 $20\mu m$ に対応している。(a)図の先頭部には砥粒のかみ込み時の無数の圧こんがあり、図で明るく見えるが、肉眼ではなし地にくもって見える。それに続く部分には細かい引掻きの条こんが多く、凝着部は少なく小さい。それに対して後端部を示す(b)図では凝着面特有の荒れた面になっている。このように一般的に先頭側摩擦面はアブレシブ摩耗的、後端部は凝着摩耗的であり、摩耗量が多くなる条件ほどそのときの摩擦面は全体的に凝着摩耗的性格が強くなる。

アブレシブ粒子によって除去される容積は条こんの溝容積の15%程度であろう。<sup>7)</sup> 従って遠藤らは、固形粒子を含む潤滑油中での摩耗機構は塑性疲れまたは低サイクル疲労であるとして解析している。<sup>4)</sup> 本研究では、摩擦面写真やあらさ曲線から平均粒径よりはるかに大きいくぼみや凝着物が観察されること、摩耗量の多い条件の場合ほど摩擦面が凝着摩耗的であること、ほとんど切りくず状摩耗粉が見られないことなどを考えると、摩耗機構を単純にアブレシブ摩耗とみなすことはできない。本研究では、微小の砥粒を微量混入した場合の潤滑摩耗であり、砥粒の荷重負担率がかなり小さい。砥粒により絶えず生成する新鮮な切りくず状摩耗粉や掘り起しの突部が新しい凝着の核となり、通常のおだやかな潤滑摩耗状態に落ちつけず、凝着が激しい。摩耗のきっかけは砥粒による引掻きであっても、摩耗機構の主役は凝着であり、砥粒が凝着現象を促進させることで摩耗率が大きくなる。笹田ら<sup>8)</sup>とは内容が異なるが、混入砥粒の働きを「凝着摩耗促進作用」と考えることができる。

#### 4. 結 言

微小の砥粒を微量混入した潤滑油中の摩耗現象を実験的に研究し、次のような結果を得た。

- 1) 組合せ試験片の相対的に軟らかい側に砥粒が主として埋め込まれ、硬い側が主として引掻かれて摩耗量が多くなる。
- 2) 荷重または平均粒径がある程度以上に大きくなると、砥粒が摩擦面間に侵入しにくくなるので、摩耗量はいって減少する。
- 3) 摩擦面間にくさび形すき間が構成されると、砥粒が侵入しやすくなり、摩耗量は増加する。
- 4) 摩耗量が多くなる条件の場合ほど、摩耗面は凝着摩耗的な荒れが激しくなる。

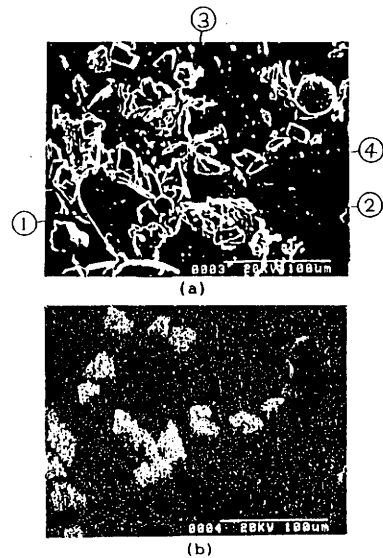


図18 砥粒と摩耗粉の写真および $Si$ 面分析結果

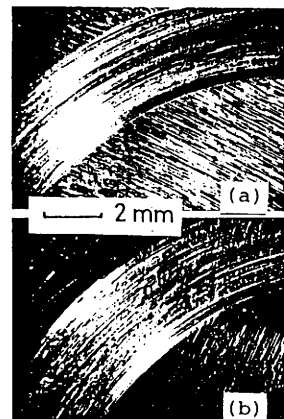


図19 B'試験片の摩擦面



- 5) 本実験条件内では、砥粒の荷重負担率は小さく、混入砥粒の機能は、直接的なアブレンプ摩耗よりは、引掻きによって絶えず新鮮な凝着の核を生成させることにより、凝着摩耗を促進させる働きが大きい。

#### 参 考 文 献

- 1) 精機学会編：精密工作便覧，コロナ社(1970) 784.
- 2) 江守信彦，笹田 直，尾池 守：潤滑 30, 1 (1985) 52.
- 3) 日本潤滑学会編：潤滑ハンドブック，養賢堂 (1978) 73.
- 4) 遠藤吉郎，福田嘉雄，木下 亨：日本機械学会論文集(第3部)38, 308 (1972) 889.
- 5) 尾池 守，笹田 直，木下秀司：潤滑27, 12 (1982) 909.
- 6) 中原綱光：潤滑32, 7 (1987) 457.
- 7) Larse-Badse, J.: Wear 12 (1968) 35.
- 8) 尾池 守，江守信彦，笹田 直：潤滑29, 1 (1984) 61.

